

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

## **DRUHY POŠKOZOVÁNÍ MATERIÁLŮ - I**

KINDS OF MATERIALS DAMAGE - I

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**VERONIKA TURKOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. ZDENĚK NETERDA**

BRNO 2008

## Anotace

Materiál zařízení výrobních jednotek je postupně poškozován. Cílem této bakalářské práce je popis mechanismu některých nejčastějších druhů poškozování materiálu v procesním průmyslu, jejich způsob posuzování zkušebními stroji a teoretickými vztahy pro potřebnou veličinu a znázornění vybraných druhů poškozování materiálů grafem, ilustrační fotografií nebo nákresem. V předkládané práci jde v první části o poškozování při vysokocyklové únavě, kde jsou vysvětleny i základní charakteristiky únavového a cyklického zatěžování. Druhá část práce uvádí poškozování tečením za zvýšených teplot a poslední, třetí část, poškozování korozí, což je nejznámějším druhem poškozování materiálů.

**Klíčová slova:** Vysokocyklová únava, tečení za zvýšených teplot, koroze

## Annotation

The material of production units is subsequently damaged. The aim of this Bachelor's Thesis is the description of way of some most frequent material defects in the process industry, the way of their judging by laboratory engines and by theoretical relations for the needed magnitude. This thesis shall show the presentation of material damages via diagram, illustrative photo and drawing. The first part of introduced thesis concerns the hyper cycling fatigue and explains basic characteristics of fatigue and cycle loading. The second part introduces the waste by high temperature flowing. The third part explains the waste by corrosion, which is the well known way of material damage.

**Keywords:** Hyper cycling fatigue, high temperature flowing, corrosion

## Bibliografická citace

TURKOVÁ, V. *Druhy poškozování materiálů - I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Neterda.



## **Prohlášení o původnosti**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci *Druhy poškození materiálů - I* vypracovala samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Zdeňka Neterdy a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne .....

.....  
Veronika Turková



## **Poděkování**

Ráda bych zde poděkovala všem, kteří mi byli oporou a pomáhali mi nejen při tvorbě této bakalářské práce, ale i v průběhu mého dosavadního studia. Zvláště pak patří díky vedoucímu této práce Ing. Zdeňkovi Neterdovi za jeho rady a věcné připomínky.



## Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	13
1 ÚVOD.....	15
2 DRUHY POŠKOZOVÁNÍ MATERIÁLU .....	16
2.1 POŠKOZOVÁNÍ PŘI VYSOKOCYKLOVÉ ÚNAVĚ .....	16
2.2 POŠKOZOVÁNÍ TEČENÍM ZA ZVÝŠENÝCH TEPLŮT (CREEP) .....	23
2.3 POŠKOZOVÁNÍ KOROZÍ .....	30
2.3.1 Druhy koroze z hlediska vnitřního mechanismu .....	32
Chemická koroze.....	32
Elektrochemická koroze.....	33
2.3.2 Druhy koroze z hlediska korozního prostředí.....	33
Atmosférická koroze.....	33
Koroze v kapalinách .....	34
Půdní koroze .....	34
2.3.3 DRUHY KOROZE Z HLEDISKA KOMBINACE S VNĚJŠÍMI ČINITELI .....	35
2.3.4 DRUHY KOROZE Z HLEDISKA TYPU KOROZNÍHO NAPADENÍ.....	35
Rovnoměrná koroze .....	35
Nerovnoměrná koroze.....	35
3 ZÁVĚR .....	38
4 LITERATURA.....	39





## Seznam použitých symbolů

<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
$b$	exponent v oblasti časové pevnosti	[-]
$B$	konstanta	[-]
$G$	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
$K$	součinitel únavy	[-]
$m$	exponent v oblasti časované pevnosti	[-]
$n$	součinitel bezpečnosti	[-]
$N$	počet cyklů	[-]
$R_e$	mez kluzu	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
$t$	doba technického života	[K]
$T$	absolutní provozní teplota materiálu	[K]
$T_c$	teplota creepu	[K]
$T_m$	absolutní teplota tavení materiálu	[K]
$\alpha$	úhel sklonu	[°]
$\Delta\sigma$	rozkmit napětí	[MPa]
$\sigma$	napětí	[MPa]
$\varepsilon_c$	creepová deformace	[-]
$\varepsilon_{el}$	elastická deformace	[-]
$\varepsilon_{pl}$	plastická deformace	[-]
$\dot{\varepsilon}_c$	rychlost creepové deformace	[-]
<b><i>index</i></b>	<b><i>význam</i></b>	
2	vztahující se k etapě sekundárního creepu	
$a, nom$	vztahující se k amplitudě nominálního napětí	
$c$	vztahující se k mezi vysokocyklové únavy	
$f$	vztahující se k porušení	
$h$	vztahující se k horní mezi	
$m$	vztahující se ke střední mezi	
$max$	vztahující se k maximu	
$min$	vztahující se k minimu	



# 1 Úvod

## PROCES POŠKOZOVÁNÍ MATERIÁLU

Materiál zařízení výrobních jednotek je během provozu trvale poškočován. Přitom je stálá snaha zvyšovat jejich pracovní parametry, což násobí rizika jejich selhání. Proto se vědci na celém světě zabývají problematikou postupné degradace vlastností materiálu v provozních podmínkách a možnostmi prodlužování spolehlivé služby zařízení poškozených provozem. Byly nahromaděny jak experimentální, tak teoretické poznatky.

## MECHANIZMY POŠKOZOVÁNÍ MATERIÁLU

Účinkem provozních zatížení je materiál zařízení výrobní jednotky postupně poškočován. Zatížení je jak mechanického původu (tlak; účinek hmotnosti; síly od potrubních systému, způsobené tlakem a účinkem vlastní hmotnosti a hmotnosti média; seismické zatížení), tak deformačního původu (teplotní pole, síly vzniklé omezením volné teplotní dilatace potrubních systémů, předpětí a pod.). Působí také vliv prostředí (chemický vliv prostředí, proudění média apod.). Tento výčet zatížení lze doplnit dalšími vlivy, které způsobí např. teplotní a deformační degradace materiálu, vodíkové zkřehnutí apod.

Proces poškozování materiálu musí být matematicky popsán, aby bylo možné stanovit úroveň jeho poškození. Proces poškozování materiálu je značně složitý a proto jeho matematický popis je většinou založen na experimentálních zkouškách materiálu. Často se obdrží jednoduché vztahy, jako je např. Wöhlerova křivka životnosti pro hodnocení poškozování materiálu v oblasti vysokocyklové únavy (kapitola 2.1). Tyto jednoduché vztahy popisují chování materiálu a proces jeho poškozování v makroobjemu materiálu. Nejsou tak dokonalé, aby podrobně popsaly změny ve struktuře materiálu během jeho postupného poškozování při zatížení. Jejich nepřesnost je kompenzována dostatečně vysokými součiniteli bezpečnosti.

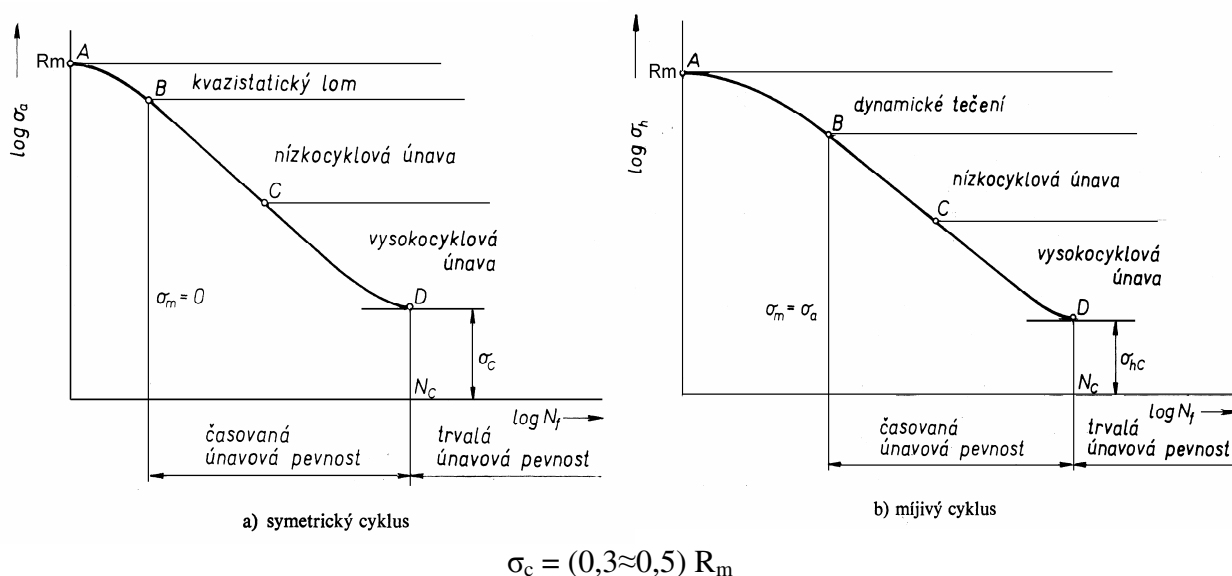
## 2 Druhy poškození materiálu

### 2.1 Poškození při vysokocyklové únavě

#### ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY ÚNAVOVÉHO ZATĚŽOVÁNÍ MATERIÁLU

Základní charakteristiky únavového zatěžování materiálu jsou nejlépe popsány v literatuře [1], [2] a [3], ze které se v tomto tématu vycházelo.

Únavový proces má kumulativní charakter. Poškození roste s počtem zátěžných cyklů. Pro každou amplitudu zatížení  $\sigma_a$  (stejná frekvence, teplota, rozměry tělesa) existuje určitý počet cyklů  $N_f$  do porušení. Jejich závislost je znázorněna křivkou únavového života  $\sigma_a$ - $N_f$  (S-N křivka), tzv. Wöhlerova křivka, na obr. 1, kterou uvádí literatura [2].



Obr. 1 Wöhlerova křivka

Oblast A-B:

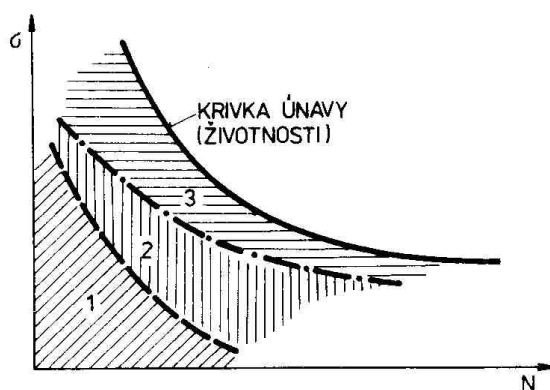
V bodě A odpovídá amplituda hodnotě meze pevnosti  $R_m$ . K lomu dojde v prvním případě po několika málo cyklech. Lom, který vznikne, nemá charakter únavového lomu, proto označení kvazistatický lom. V případě míjivého zatěžovacího cyklu dochází k cyklickému tečení (creepu).

Oblast B-C:

Oblast nízkokcyklové únavy - namáhání napětími většími než mez kluzu. Servohydraulické zkušební stroje, cyklická hysterezní smyčka, vliv vrubů.

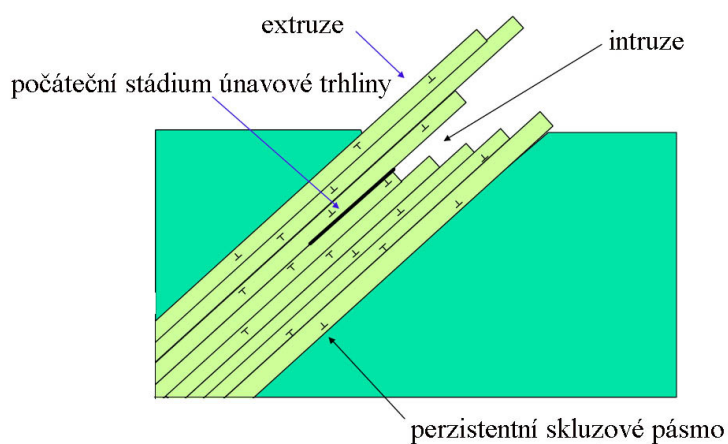
Oblast C-D:

Oblast vysokocyklové únavy - namáhání napětími menšími než mez kluzu.

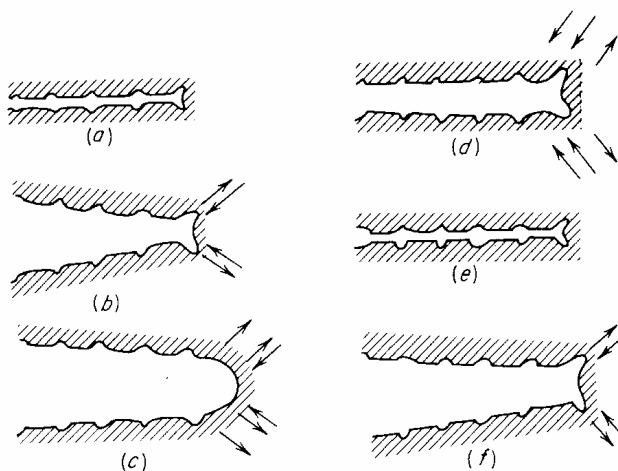
Etapy únavového života

- 1) Stádium změn mechanických vlastností obr. 2
- 2) Stádium iniciace únavových trhlin obr. 3
- 3) Stádium šíření únavové trhliny obr. 4

Obr. 2 Etapy únavového života

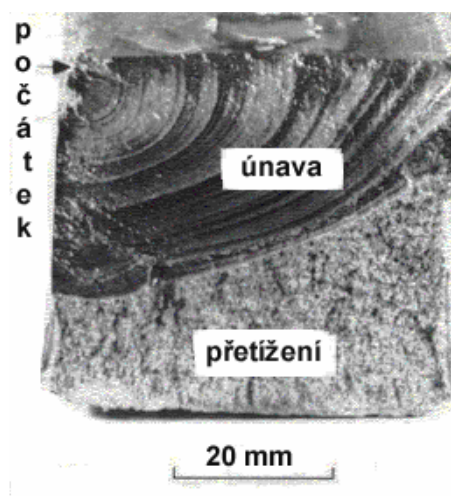


Obr. 3 Stádium iniciace únavových trhlin



Obr. 4 Stádium šíření únavových trhlin - striace

Únavový lom, jak je možné vidět na obr. 5, vzniká vždy na povrchu součásti.

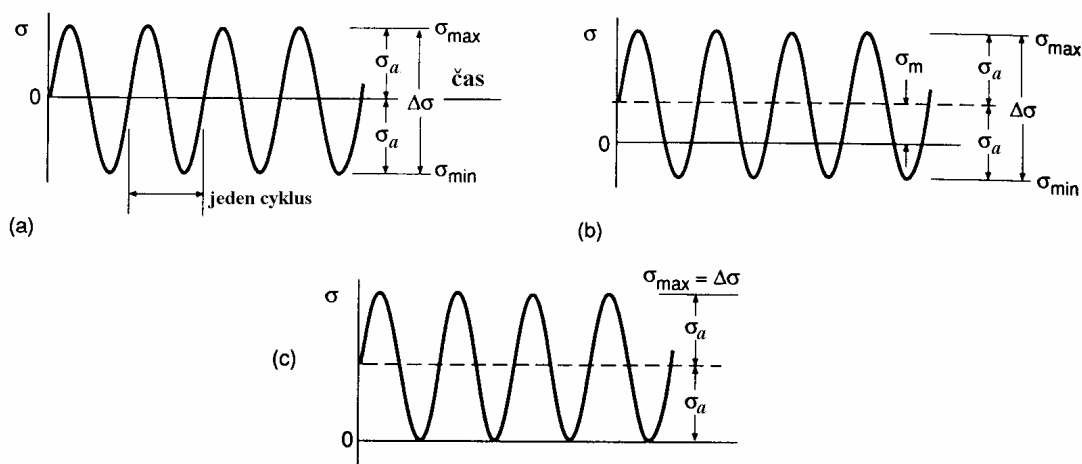


Obr. 5 Únavový lom

### Základní charakteristiky cyklického zatěžování

#### Zátěžový cyklus

- střídavý  $\sigma_m < \sigma_a$   $\sigma_m = 0$  souměrný (symetrický) cyklus obr. 6(a)  
 $\sigma_m \neq 0$  nesouměrný cyklus obr. 6(b)
- pulzující  $\sigma_m \geq \sigma_a$   $\sigma_m = \sigma_a$  míjivý cyklus obr. 6(c)  
 $\sigma_m > \sigma_a$  pulzující cyklus



Obr. 6 Zátěžový cyklus,

(a) střídavý souměrný (symetrický) cyklus, (b) střídavý nesouměrný cyklus,  
 (c) pulzující míjivý cyklus

$\Delta\sigma$  - rozkmit napětí  
 $\sigma_a$  - amplituda napětí  
 $\sigma_m$  - střední napětí  
 $\sigma_{\max}$  - maximální napětí  
 $\sigma_{\min}$  - minimální napětí

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}$$

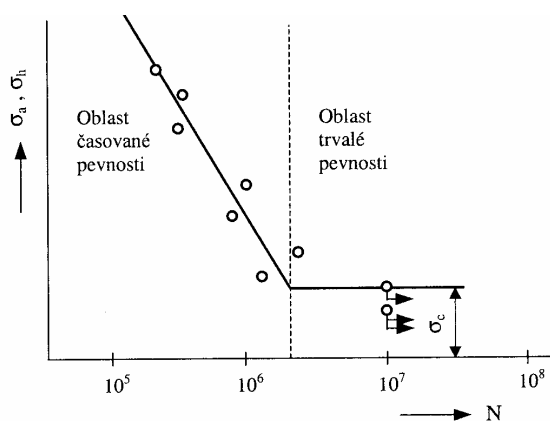
## POŠKOZOVÁNÍ PŘI VYSOKOCYKLOVÉ ÚNAVĚ

O vysokocyklové únavě materiálu nejlépe pojednává literatura [3], [4] a [5], která byla pro následující popis tématu použita.

Vysokocyklová únava materiálu zařízení vzniká jak účinkem cyklického zatěžování materiálu, tak opakovanými změnami teplot prostředí, které v nich vyvolávají opakovaná teplotní napětí. Vysokocyklová únava vede ke vzniku mikrotrhlin zejména v povrchových vrstvách materiálu, v místech vrubových účinků, obecně koncentrací napětí způsobených změnami tvaru nebo technologickými makrodefekty materiálu, jako jsou inkluze, technologické trhlinky a pod. Povrchové vrstvy těles v nezpevněném stavu vykazují nejnížší mez kluzu (mez plastických deformací). Proto při cyklické elastické deformaci tělesa vzniká v povrchových vrstvách lokální plastické přetvoření materiálu, většinou soustředěné do plastických mezioblastí. V těchto místech se postupně vyvíjí únavové kluzné pásy. Oblasti mají klínový tvar s největší koncentrací dislokací na jejich hrotu. Pokud kluzné pásy dorostou kritické hloubky, objevují se v nich první únavové mikrotrhliny. Také na rozhraní makrodefektů a matrice materiálu vznikají dutiny, které iniciují trhlinky. Bariéry proti hromadění těchto poškození jsou v přirozených povrchových vrstvách nejnížší, je v nich nejmenší tvrdost materiálu a nejnížší cyklické zpevňování materiálu. Šířka hysterezní nasycené smyčky je zde největší a tím je největší i pohlčená deformační práce. Přitom v povrchových vrstvách těles obvykle nepříznivě působí tahová zbytková napětí, vyvolaná výrobou. Také napětí od zatížení jsou zde největší a to jak silového, tak deformačního (teplotního) původu.

Vysokocyklová únava poté vede ke vzniku systému fyzikálně malých trhlin, řádu desetin milimetru. Jedná se o proces spojování strukturně malých trhlin při interakci s defekty struktury, dutinami a inkluzemi. Malé trhliny se postupně rozvíjejí dovnitř tělesa. Při přechodu přes povrchovou vrstvu materiálu, řádu nejvýše několika milimetrů, vniknou trhliny do hloubky tělesa. Poté se šíří jako magistrální makrotrhliny až do kritické velikosti, při které vznikne rychlý závěrečný lom tělesa.

V oblasti vysokocyklové únavy se používají modifikované křivky životnosti Wöhlera. Vyjadřují závislost amplitudy nominálního napětí  $\sigma_{a,nom}$  na počtu cyklů do lomu  $N_f$ ,  $\sigma_{a,nom} = f(N_f)$ . V grafickém tvaru je Wöhlerova křivka životnosti znázorněna na obr. 7.



Obr. 7 Modifikovaná Wöhlerova křivka životnosti

Pro specifikaci určité amplitudy napětí z S-N křivky pro určitou dobu života se používá termín "únavová pevnost". To znamená, že únavová pevnost pro  $10^5$  cyklů je jednoduše amplituda odpovídající počtu cyklů do porušení  $N_f = 10^5$ . Vysokocyklová únava představuje



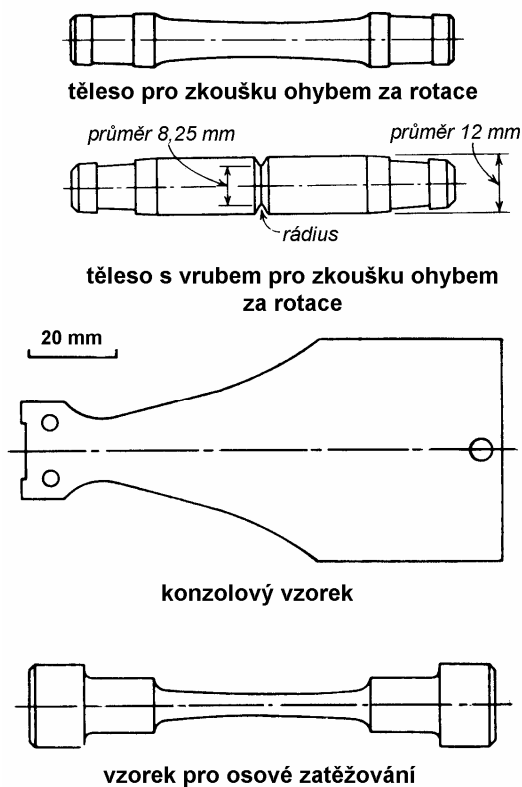
situaci dlouhého únavového života, tj. amplituda napětí je dostatečně nízká a tedy plastická deformace není dominující pro chování materiálu. Vysokocyklová únava začíná od počtu cyklů  $10^2$ - $10^4$ .

K základním zkouškám odolnosti materiálu vůči únavovému porušení patří zjišťování S-N křivek. Pro přibližné stanovení Wöhlerovy křivky, je, kvůli značnému rozptylu napětíových hodnot životností na jednotlivých napětíových hladinách při únavové zkoušce, potřeba přibližně 8-12 vzorků. Pro přesnější stanovení jejího průběhu, případně i pro její statistické vyhodnocení je potřeba 15-20 zkušebních těles, v některých speciálních případech až stovky vzorků.

### Zkušební vzorky

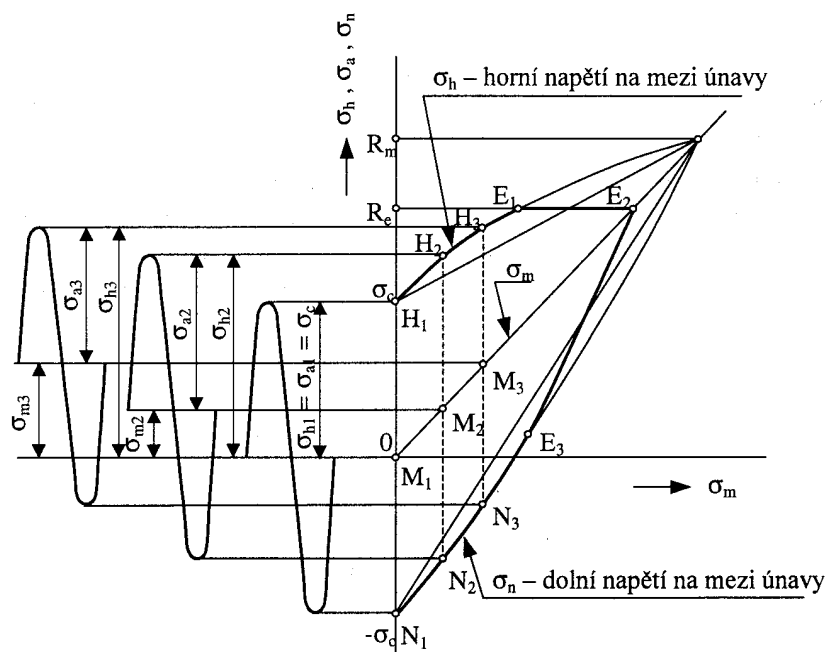
Zkušební vzorky pro únavové zkoušky jsou navrhovány tak, aby je bylo možné použít pro studium daného problému a současně i upnout do zkušebního stroje, který je k dispozici. Pro stanovení jedné únavové křivky musí být stejné z hlediska materiálu jakosti povrchu, tvaru a rozměrů. Některé příklady zkušebních těles jsou ukázány na obr. 8. Nejjednodušší jsou tělesa nevrubovaná, nebo také označovaná jako hladká. Tvarem tato tělesa připomínají zkušební vzorky pro zkoušku tahem. Tělesa s koncentrátorem napětí, vrubem, se používají k hodnocení citlivosti materiálu na vruby při cyklickém zatěžování. Zkouška probíhá tak, že se první vzorek zatíží napětím jež je blízké mezi kluzu materiálu a další se postupně zatěžují napětím stále nižším, až se dosáhne hladiny napětí, při které vzorky vydrží bez porušení předepsaný počet cyklů  $N$ . Podle ČSN platí pro různé materiály tyto hodnoty  $N$ : oceli, litiny měď a její slitiny ... $10^7$  cyklů,  
lehké kovy a jejich slitiny ... $10^8$  cyklů.

Vedle zkušebních těles se na únavu zkouší i šroubové, i svarové spoje a dokonce i součásti strojů a zařízení.



Obr. 8 Příklady zkušebních těles

Z takto získaných údajů se Wöhlerova křivka vyhodnotí nejčastěji v semilogaritmickém systému  $\sigma_a$ -log N. Pro získání dokonalé představy o únavovém chování materiálu, je třeba stanovit několik Wöhlerových křivek s různou asymetrií cyklů a z nich sestojit diagram mezních cyklů neboli Smithův únavový diagram. Tento diagram vyjadřuje vztah mezi hodnotami meze únavy pro různé druhy asymetrie cyklu. Jeho konstrukce je patrná z obr. 9.



Obr. 9 Smithův diagram

Křivky životnosti, uvedené v následujících tvarech, určují, na základě zkoušky vzorku, oblast časové pevnosti:

- Křivka životnosti s lineární závislostí ( $\sigma_{a,nom}$  - log N)

$$N = N_c \cdot 10^{b(\sigma_{a,nom} - \sigma_c)}$$

- Křivka životnosti s nelineární závislostí (log  $\sigma_{a,nom}$  - log N)

$$N = N_c \cdot 10^b \cdot \left[ \frac{\sigma_c - K}{\sigma_{a,nom} - K} \right]^{-b}$$

- Křivka životnosti s lineární závislostí v souřadném systému log - log

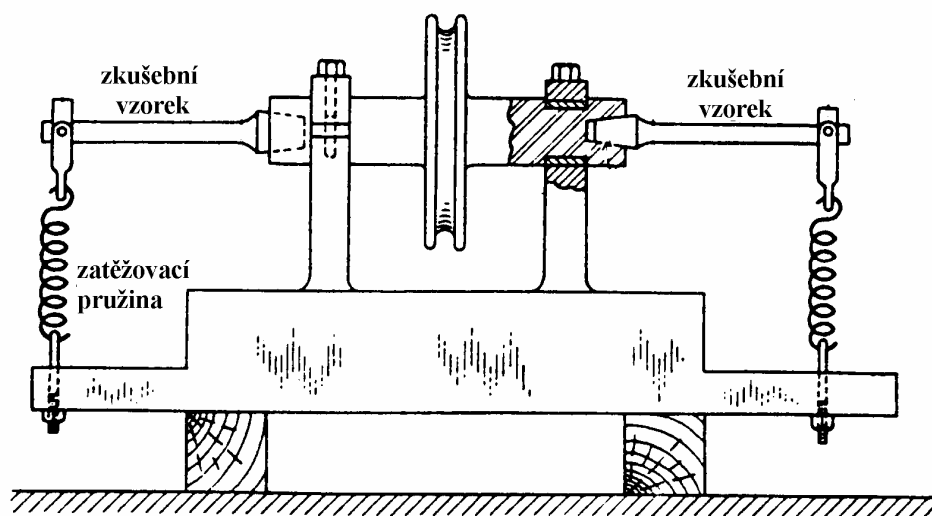
$$N = N_c \cdot \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_{a,nom}} \right)^m$$

- kde
- b - exponent v oblasti časové pevnosti
  - K - součinitel únavy
  - m - exponent v oblasti časované pevnosti
  - N - počet cyklů do porušení
  - $N_c$  - počet cyklů na mezi vysokocyklové únavy
  - $\sigma_{a,nom}$  - amplituda nominálního napětí
  - $\sigma_c$  - mez vysokocyklové únavy pro souměrně střídavý cyklus zatížení

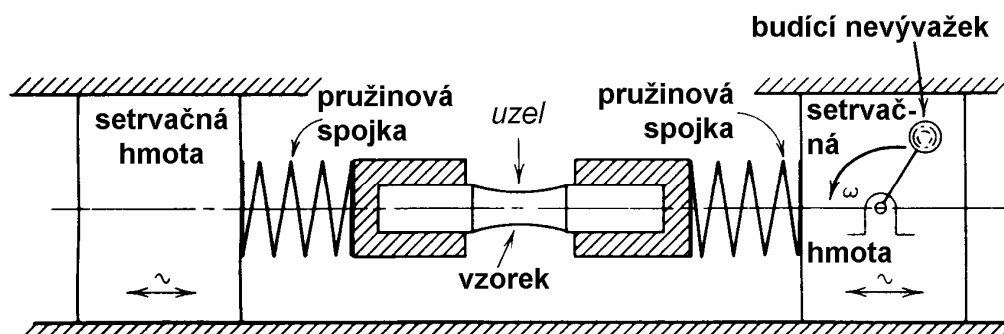
Zkušební zařízení

Wöhlerův zkušební stroj na obr. 10 je zařízení, které zkušební vzorek zatěžuje tzv. ohybem za rotace. Podobná zařízení se používají dodnes ve verzi čtyřbodového ohybu. V případě obou typů zkoušek ohybem za rotace je střední napětí rovno nule.

Dalším typem zkušebních strojů pro únavové zkoušky (vysokocyklová únava) je rezonanční pulsátor na obr. 11. Podstatou zkoušky je mechanické buzení, při němž nevývažek rotuje s vhodnou rezonanční frekvencí  $\omega$ . V současné době vyráběné pulsátory umožňují nastavení středního napětí a jiného způsobu zatěžování než tah-tlak, např. ohyb.



Obr. 10 Wöhlerův zkušební stroj



Obr. 11 Mechanický rezonanční pulsátor

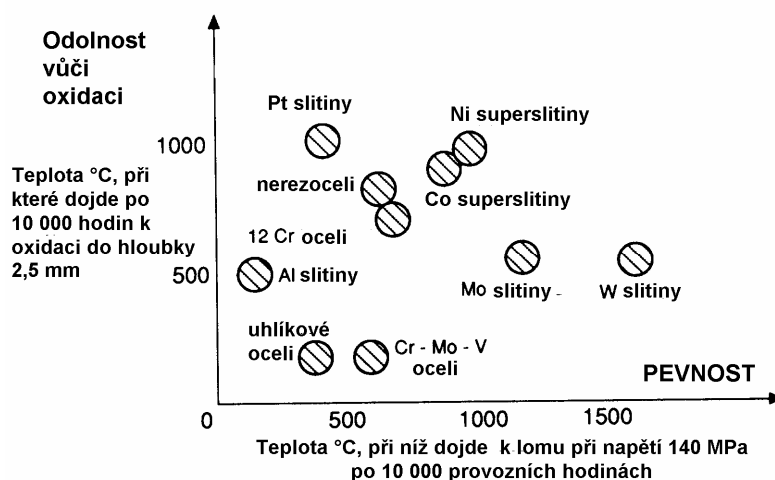
## 2.2 Poškození tečením za zvýšených teplot (creep)

Poškození tečením za zvýšených teplot, neboli creep, uvádí literatura [3] a [6], ze které bylo pro toto téma čerpáno.

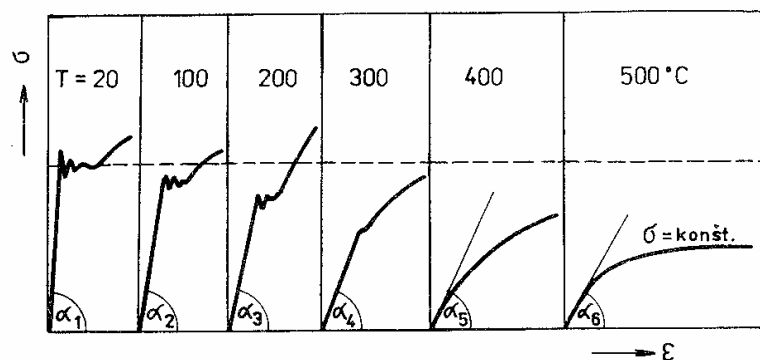
V polovině 20. století, bylo zjištěno, na základě několika závažných havárií v elektrárnách a chemických zařízeních, vystavených vysokým teplotám, že při dlouhodobém namáhání nevzniká stabilní deformace odpovídající úrovni napětí, ale že se plastické deformace s dobou zatížení zvětšují. Materiál tzv. "teče", současně se poškozuje struktura materiálu a materiál s dobou provozu křehne a ztrácí houževnatost.

Poškození tečením za zvýšených teplot, neboli creep, je časově závislá deformace, způsobená teplotní aktivací pohybu vakancí a dislokací materiálu pod zatížením za vysoké teploty. Jednodušeji je creep pomalá plastická deformace materiálu vyvolaná dlouhodobým působením teploty a času. Vliv zvýšených teplot na vlastnosti materiálů znázorňuje obr. 12 a dále na obr. 13 je vyobrazen vliv teploty na tahový diagram nízkouhlíkové oceli. Creepové chování materiálu začíná nabývat významu při teplotě  $T$  vyšší než je teplota creepu  $T_c$  ( $T > T_c \sim 0.4T_m$ ), kde  $T$  [K] je absolutní provozní teplota materiálu a  $T_m$  [K] absolutní teplota tavení materiálu.

Poškození tečením za zvýšených teplot je nezanedbatelné u strojů a zařízení, které za vysokých teplot pracují. Mezi tyto zařízení patří jaderné reaktory, parovody, turbíny, spalovací motory apod.



Obr. 12 Vliv zvýšených teplot na vlastnosti materiálů



Obr. 13 Vliv teploty na tahový diagram nízkouhlíkové oceli

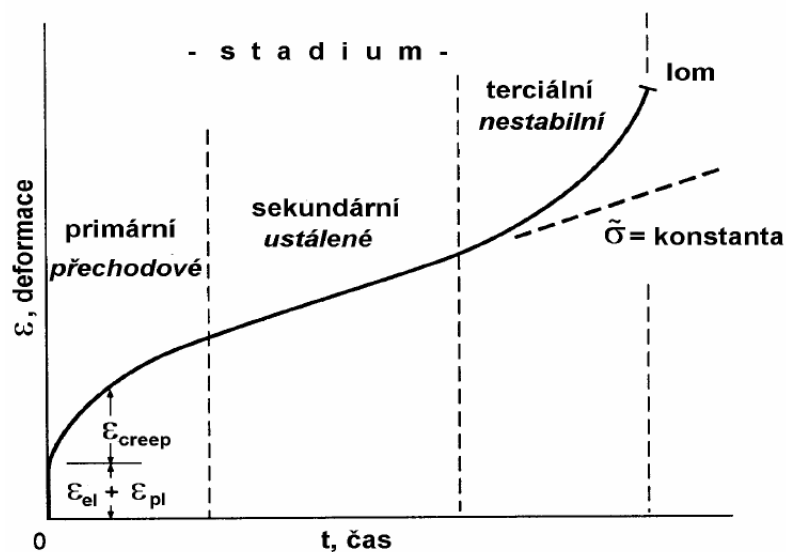
Do 350°C: postupně mizí výrazná mez kluzu; hodnota  $R_e$  klesá, vzniká deformace pohybem dislokací

Nad 350°C: zaniká výrazná mez kluzu a tvar tahového diagramu výrazně ovlivňuje jak teplota, tak i rychlost zatěžování. Vzniká deformace difusí atomů a dochází k jevu označovanému jako tečení (creep)

Základem děje je samodifúzní tečení v rozmezí nejčastěji užívaných teplot, což umožní pohyb dislokací kolmo k rovinám kluzu. Tak se dislokace dostávají na jiné kluzné roviny obsazené dislokacemi opačného znaménka a uskutečňuje se jejich vzájemná anihilace.

Anihilace je proces, který může nastat, když se setká částice se svou antičásticí. Při anihilaci se částice z hmoty a z antihmoty kompletně přemění v energii, zatímco u podobného děje, u rozpadu, se na energii přemění pouze určitá část hmotnosti částice a zbytek se projeví jako hmotnost nových částic - produktů rozpadu.

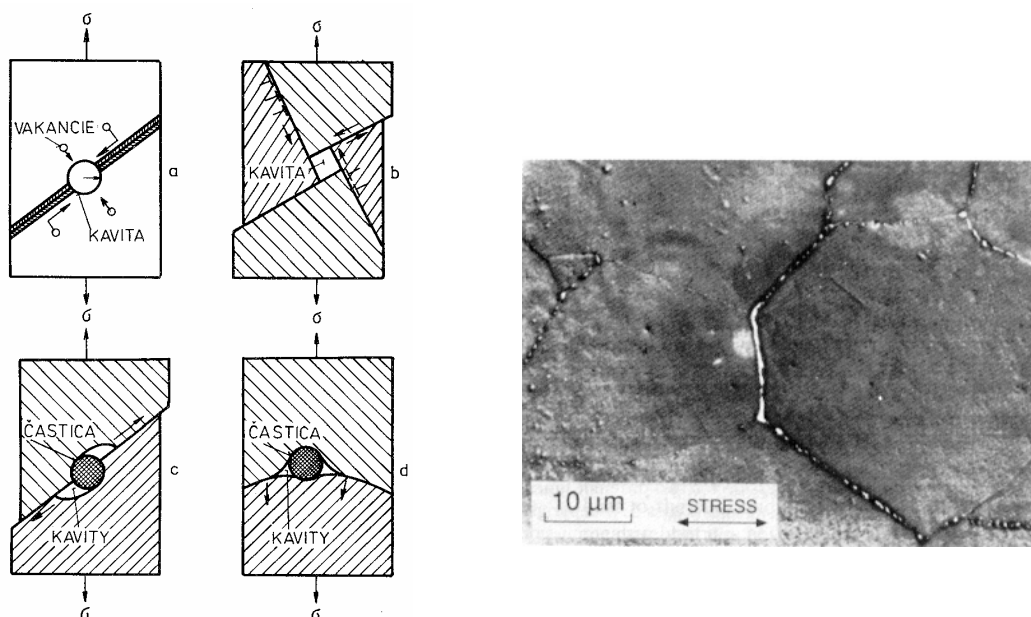
Po anihilaci počet dislokací klesá a snižuje se jejich průměrná hustota. Při daném vnějším zatížení se uvolňuje kluzný pohyb a plastická deformace se zvětšuje. Toto zotavování, které je spojeno s poklesem tvrdosti, je kompenzováno vznikem nových dislokací a zpevněním materiálu. Při daném napětí se tak udržuje rovnováha mezi oběma protichůdnými procesy a to za cenu trvalého poškozování materiálu a růstu trvalého přetvoření tělesa. Tento děj odpovídá sekundárnímu úseku v creepové charakteristice na obr. 14, který má v životě konstrukce největší úlohu. Rychlost tečení je zde nejmenší, proto také trvá nejdéle.



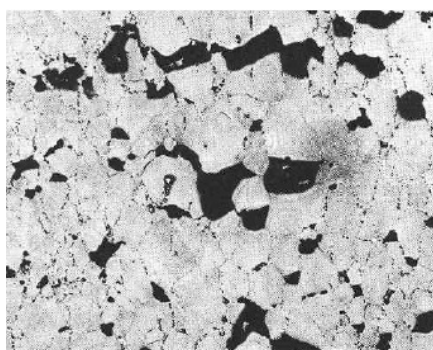
Obr. 14 Creepová charakteristika

Proces tečení není ve struktuře materiálu rovnoměrně rozložen. Difúzní procesy vedou ke koncentraci vakancí do tzv. kavit (dutin), zobrazených na obr. 15, které se tvoří u hranic zrn, tam, kde je mřížka nejméně pravidelná. Hranice zrn se stávají měkkými a deformace zrn vede k jejich vzájemnému pohybu. Tím se ve styku tří zrn tvoří ostré klínové dutiny, které lze považovat za trhlinky. Popsaný proces je provázen poškozením oblastí podél hranic zrn, které jsou prostoupeny dutinami a trhlinkami.

Hustota materiálu v těchto místech značně klesá a snižuje se zde jeho kohezní pevnost. Materiál se jeví jako zkřehlý. Nastane-li v exponovaných místech zmenšení nosné plochy asi o jednu třetinu, vzniká třetí stádium procesu tečení materiálu za tepla. Mikrotrhliny se zhušťují a spojují a vzniklé trhliny se rozvíjí až do lomu, obr. 16, podle představ lomové mechaniky kvazikřehkého materiálu.



Obr. 15 Pokluzu po hranicích zrn-vznik kavit

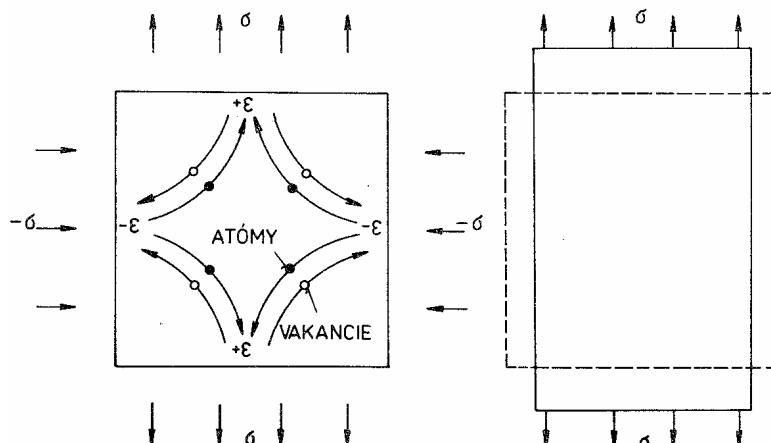


Obr. 16 Lom při creepu

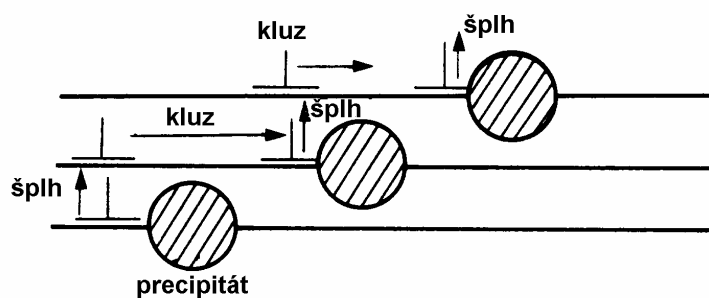
Rychlost tečení ve třetím stádiu creepu závisí na mnoha mechanických a materiálových podmínkách. Závisí také na tvaru tělesa. Rozdíl je mezi válcovou nádobou a válcovou zkušební tyčí. Projevu se vliv víceosé napjatosti. Rozhodující oktaedrické smykové napětí u válcové nádoby je menší při stejném největším tahovém napětí a tím také menší rychlost tečení. Zvětšováním průměru válcové nádoby roste účinek vnitřního přetlaku a současně klesá tloušťka stěny tělesa. Tím progresivně roste rozhodující napětí pro vznik porušení. Přestávky v provozu zvyšují průměrnou rychlost tečení opakováním primárního úseku procesu tečení. Je třeba respektovat vlivy koncentrace napětí a relaxace napětí v místě změny tvaru stěn, v místě hrdel, spojení se dny a pod. Také tvarové odchylky a defekty ve svarových spojích mají nepříznivý vliv. Vrubové účinky mají při vysokých teplotách a velmi dlouhých dobách zatížení negativní vliv na životnost tělesa.

Studium procesu tečení za tepla vedlo ke snaze zpevnit hranice zrn, zvětšit zrna tak, aby objemy materiálu podél hranic zrn byly relativně v průřezu co nejmenší a použít takové legování ocelí, které by dávalo co nejpevnější složky (karbidy molybdenu, chrómu, vanadu a wolframu) za vysokých teplot. Feriticko - perlitické žárupevné oceli jsou použitelné do 600°C, pro vyšší teploty lze použít austenitické oceli. Pro teploty nad 800°C se používají žárupevné slitiny kovu a pro perspektivní účely nad 1200°C keramika a kombinované materiály.

Příčinou creepu je difúze atomů mřížky pod účinkem napětí a zvýšené teploty. U kovových materiálů se rozlišují dva typy tečení a to difúzní creep, obr. 17 a dislokační creep, obr. 18.

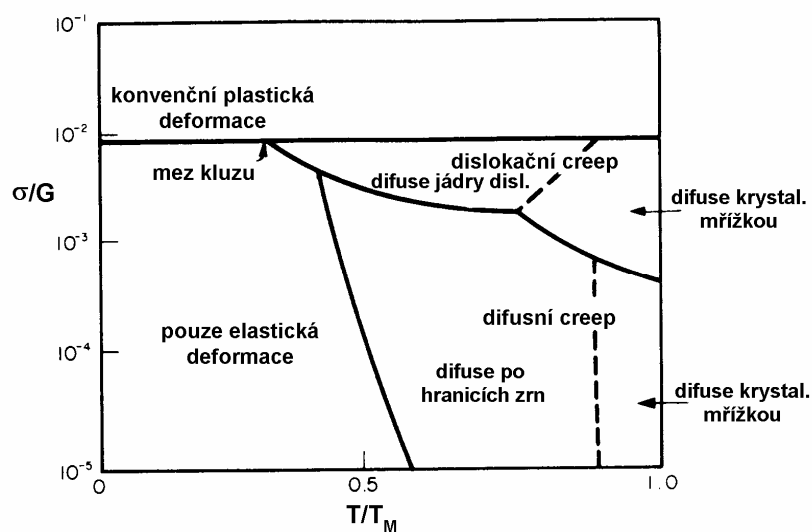


Obr. 17 Difúzní creep



Obr. 18 Dislokační creep

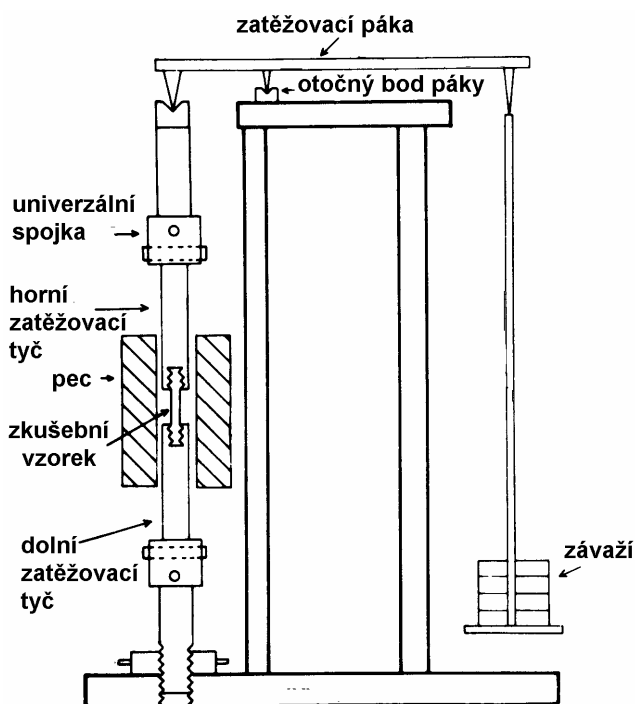
Mapy deformačních mechanismů jsou zřejmé z obrázku obr. 19.



Obr. 19 Mapy deformačních mechanismů

### Creepová zkouška

Creepová zkouška daného materiálu se provádí na zkušebním stroji na creepové zkoušky, jak je možné vidět na obr. 20 a obr. 21. Zkouška se provádí za vysoké teploty při daném zatížení v čase. Měří se deformace za čas a doba do lomu.



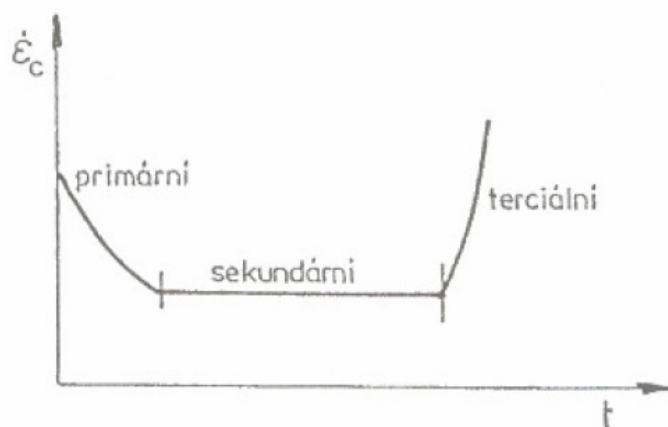
Obr. 20 Schéma zkušebního stroje na creepové zkoušky



Obr. 21 Zkušební stroje na creepové zkoušky



Každou naměřenou creepovou křivku časové změny deformace lze rozdělit do tří etap, a to na primární, sekundární a terciální creep, jak bylo již možné sledovat na obr. 14. Při vyšetření velikosti rychlosti creepové deformace lze pozorovat její pokles v průběhu primárního creepu, její téměř konstantní hodnotu během sekundární fáze a konečně její rychlý vzrůst v průběhu terciálního creepu až do porušení materiálu. Průběh creepové deformace znázorňuje obr. 22.



Obr. 22 Creepová deformace

### TEORETICKÉ VZTAHY MODELU CREEPU

Pro teoretické vztahy jednotlivých etap creepu, byla použita literatura [4], nejlépe vystihující tuto problematiku.

#### ETAPA PRIMÁRNÍHO CREEPU

Pro určení creepové deformace při proměnném napětí v čase jsou používány tyto základní modely:

**Časové zpevnění:** Rychlost creepové deformace  $\dot{\epsilon}_c$  závisí na průběhu napětí a čase od počátku testu. Nebere v úvahu krátkodobou změnu napětí.

$$\dot{\epsilon}_c = m \cdot B \cdot \sigma^n \cdot t^{(m-1)}$$

**Deformační zpevnění:** Velikost rychlosti deformace  $\dot{\epsilon}_c$  závisí na dosahovaném napětí a na již akumulované creepové deformaci.

$$\dot{\epsilon}_c = m \cdot B^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma^{\frac{n}{m}} \cdot (\epsilon_c)^{\frac{m-1}{m}}$$

- B - konstanta
- m - exponent v oblasti časové pevnosti
- n - součinitel bezpečnosti
- t - doba technického života
- $\epsilon_c$  - creepová deformace
- $\sigma$  - napětí

Deformační zpevnění ve srovnání s časovým vykazuje strmější růst creepové deformace, poněvadž bere při výpočtu v úvahu kromě dosaženého napětí také již akumulovanou creepovou deformaci. Časové zpevnění je snadné pro užití, avšak deformační zpevnění je přesnější. Dává výsledky, které jsou srovnatelné s experimenty. Oba dva modely předpokládají, že zátěžné napětí nebude v průběhu času měnit svoji orientaci a zároveň, že výpočet nebude pokrývat všechny 3 etapy creepu současně.

## ETAPA SEKUNDÁRNÍHO CREEPU

Pro určení velikosti sekundární creepové deformace  $\varepsilon_c$  se používá vztah Nortona pro jednoosou napjatost ve tvaru:

$$\varepsilon_c = B_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot t$$

Pro rychlost sekundární creepové deformace  $\dot{\varepsilon}_c$  platí vztah:

$$\dot{\varepsilon}_c = B_2 \cdot \sigma^{n_2}$$

$B_2$  - konstanta

$n_2$  - součinitel bezpečnosti

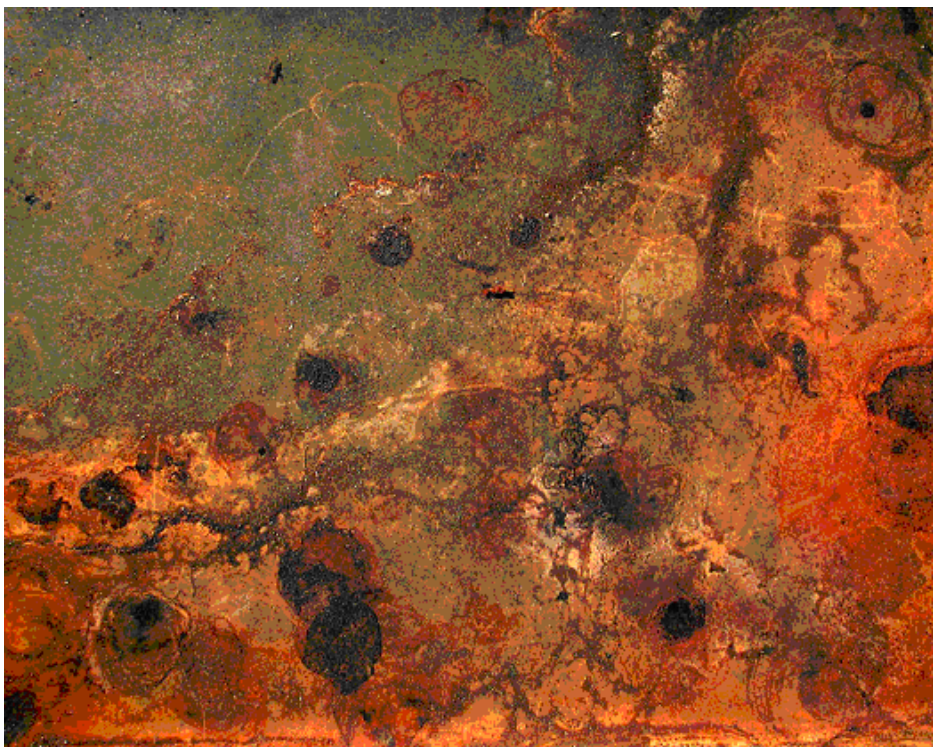
$t$  - doba technického života

$\sigma$  - napětí

## 2.3 Poškození korozí

Koroze je chemické nebo fyzikálně chemické znehodnocování kovových materiálů, působením okolního korozního prostředí, jak pojednává literatura [7] a [8], ze které bylo dále vycházeno. Nejčastější korozní prostředí je kapalné nebo plynné.

Přírodní prostředí (atmosféra nebo voda) je znečišťováno průmyslovou činností, čímž stoupá jeho agresivita. Koroze představuje převážně chemickou nebo elektrochemickou heterogenní reakci na povrchu kovu, při níž se kov stává oksyločeným. Okysličením je v širším slova smyslu každá reakce, při které materiál ztrácí elektrony. Většina kovů a slitin je v podstatě nestálá a samovolně přechází do oksyločeného stavu. Přechod je charakterizován snížením volné entalpie soustavy, které je prvopočátkem pravděpodobnosti vzniku koroze. Korozní napadení se může projevovat rozdílně, od změny vzhledu až po úplný rozpad celistvosti materiálu. V průběhu korozního rozrušení vzniká v mnoha případech tzv. nová fáze - korozní zplodina, která značně ovlivňuje charakter i rychlost korozního napadení. Nejznámější takovou zplodinou je rez, obr. 23.



Obr. 23 Rez, nejznámější forma koroze

Korozi podléhají nejen kovy a jejich slitiny, ale také nekovové materiály, jako jsou např. keramické nebo silikátové anorganické látky (sklo, beton), organické látky (guma, plasty) a další materiály. Poškození materiálu korozí může být rozdílné. Může se projevovat změnou jeho vzhledu (ztráta lesku, barvy), úbytkem materiálu a tvorbou korozních produktů, úplným rozpadem materiálu (porušení celistvosti v celém průřezu) a nebo změnami materiálu, které nejsou sice tak zjevné (např. ztráta pevnosti, tažnosti, vznik mikrotrhlin), ale projeví se za čas, např. korozním praskáním. Názorné příklady koroze zobrazuje obr. 24.

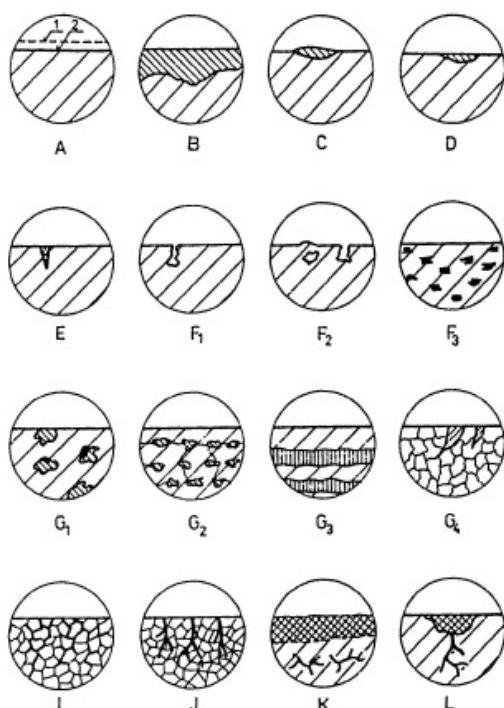


Obr. 24 Příklady koroze

Při korozi zinku v elektrolytech vzniká hydroxid zinečnatý nebo zásadité soli zinku, při korozi mědi hydroxid měďnatý atd. Jestliže se při korozním ději vytvoří na povrchu kovu ochranná vrstva, hovoříme o pasivitě. Obecně může být pasivní vrstva tvořena sloučeninami různého složení. Obvykle jsou to stálé kysličníky, jako je tomu např. u železa v kyselině dusičné, u korozivzdorných ocelí, chromu, titanu apod. Podmínkou vzniku pasivity je buď oxidační charakter korozního prostředí, nebo polarizace vnějším zdrojem stejnosměrného proudu na požadovanou potenciálovou hodnotu.

Podle změny volné entalpie je největší pravděpodobnost vzniku koroze u hliníku, hořčíku a chromu. V praxi jsou však tyto kovy v mnoha prostředích podstatně odolnější než např. železo. Je to způsobeno ochrannými vlastnostmi nových fází, velmi tenkých povrchových vrstev korozních zplodin, které jsou u hliníku a chromu podstatně výhodnější než u železa.

Různé formy korozního napadení, obr. 25, závisí na materiálu (druh, struktura, vlastnosti, čistota), na korozním prostředí a na podmínkách, kterým je materiál vystaven.



Obr. 25 Některé druhy korozního napadení

- A- rovnoměrné napadení  
(1- původní povrch, 2- povrch po napadení)
- B- nerovnoměrné napadení
- C- skvrnité napadení
- D- důlkové napadení
- E- bodové napadení
- F- podpovrchové napadení
- G- selektivní napadení
- I- mezikrystalové napadení
- J- transkrystalové napadení
- K- extrakční napadení
- L- korozní trhliny

### 2.3.1 Druhy koroze z hlediska vnitřního mechanismu

#### Chemická koroze

Chemická koroze je z hlediska fyzikální chemie heterogenní chemická reakce mezi tuhou a plynnou fází. Zahrnuje korozi v plynech a neelektrolytech. Nejrozšířenější chemickou korozi je oxidace kovů a slitin. Jejich charakteristickou zvláštností je tvorba vrstvy korozních zplodin přímo na místech, kde došlo ke korozní reakci produktů. Další růst a rychlost koroze závisí na jakosti této vrstvy a možnosti průniku korozních činitelů touto vrstvou. Proto jsou velmi důležité i elektrické vlastnosti vrstvy (vesměs polovodičové), především u tuhých korozních zplodin celistvého charakteru. Kvůli značnému rozdílu, především v průchodu elektrického proudu korozním prostředím, rozlišujeme korozi chemickou v plynném prostředí a elektrochemickou v kapalných elektrolytech.

U řady kovů netvoří korozní zplodiny na povrchu celistvý povlak (např. Li, K, Ba, Sr). Stává se to především tehdy, jestliže je molekulární objem vznikající sloučeniny menší než atomový objem korodujícího kovu. Tím postupně klesá rychlost koroze-vrstva má ochranné vlastnosti. Většina technicky významných kovů tvoří souvislou vrstvu zplodin, avšak její ochranná schopnost může být velmi rozdílná. V praxi je důležité zkoumání růstu tlustších vrstev, protože při velké tloušťce vrstvy se narušuje její celistvost vnitřním pnutím (např. Fe, Cu). Vhodná struktura a velký ohmický odpor vrstvy jsou základní činitele rozhodující o korozní rychlosti. Společně jsou pak s plasticitou a soudržností s kovovým podkladem dalšími podmínkami dobrých ochranných vlastností.

Na korozi v plynném prostředí má často rozhodující vliv difúze, proto je nutné při řešení problémů vysokoteplotní oxidace uvažovat jak hledisko termodynamické, tak kinetické. Z termodynamických údajů, vyjádřených nejlépe hodnotami volných entalpií, lze zjistit, zda korozní reakce zásadně může či nemůže probíhat. Při přesažení teploty 600°C se železo pokryje tzv. oxidickou vrstvou (okuje) složenou ze tří kyslíčků, z nichž vrstva FeO je nejtlustší. Komplexní vrstvy kyslíčků se mohou tvořit u kovů s vyšším mocenstvím (např. Fe, Cu).

Ke korozi v plynném prostředí může dojít i bez vzniku vrstev na povrchu. Takovéto případy se stávají například ve vodíku, za vyšších teplot nebo tlaků, kdy vodík snadno difunduje do kovu.

Poškození oceli vodíkem může být dvojího druhu:

- Vodíková křehkost - je způsobena hlavně vodíkem rozpuštěným v oceli
- Vodíková koroze - důsledek reakce rozpuštěného vodíku s uhlíkem v oceli. Při této reakci vzniká metan, který není schopen difundovat a hromadí se proto na místě vzniku, hlavně na hranicích zrn, kde působí silná pnutí vedoucí k trhlinám.

Chemické korozi kovu je možné předejít úpravou jeho složení tak, aby vznikající korozní zplodiny měly žádoucí ochranné vlastnosti, nebo aby strukturní fáze slitiny byly velmi stálé (např. karbidy v ocelích odolných proti vodíku). Významná je i ochrana proti korozi za vysokých teplot anorganickými nekovovými povlaky (sklovité smalty, keramické povlaky). Průběh koroze může zásadně ovlivnit mnohdy i malá koncentrace určité složky v prostředí. Proto je velice důležité před rozhodnutím o ochraně proti korozi, pečlivě zvážit složení prostředí. Stříbro například nekoroduje na vzduchu ani za vysokých teplot, ale malá příměs H<sub>2</sub>S nebo SO<sub>2</sub> způsobuje značné korozní úbytky.

K chemické korozi patří také korozní reakce v kapalném prostředí. Takovým prostředím jsou například kapalná paliva a mazací oleje.



### Elektrochemická koroze

Elektrochemická koroze se řídí zákony elektrochemické kinetiky. Rozdíl mezi elektrochemickou a chemickou korozí je nejčastěji ve způsobu tvorby korozních zplodin. Reakcí primárních zplodin anodového a katodového děje vznikají zplodiny většinou mezi plošně oddělenými místy obou těchto dějů.

Každá korozní reakce v sobě zahrnuje dvě dílčí reakce - anodovou a katodovou, protože jde o reakce oxidačně redukční. Anodová reakce odpovídá oxidaci kovu a tedy vlastně korozi. Katodová reakce, zvaná též depolarizační, odpovídá redukci. Anodová a katodová reakce představují tedy dohromady korozní děj a podle okolností mohou probíhat buď na tomtéž místě povrchu korodujícího kovu, nebo na jiném místě. Na stejném místě povrchu probíhají obě dílčí reakce tehdy, je-li kov zcela homogenní a jestliže i složení roztoku je stejné po celé ploše dotyku s kovem. Spojením dvou kovů v korozním prostředí může vzniknout korozní makročlánek, přičemž se anodová reakce soustředí především na méně ušlechtilý kov, avšak nelze vyloučit její průběh na obou kovech. Podobné spojení různorodých částí vzniká totiž i ve struktuře kovů a slitin. Nestejnorodost kovů a slitin i malé rozdíly ve složení roztoku na různých místech korodujícího povrchu (často již rozdílné provzdušnění) vedou k tomu, že anodová a katodová reakce se místně oddělí mezi anodou a katodou. Mezi oběma místy potom probíhá proud a vzniká mikročlánek.

Nejdůležitější druhy elektrochemické koroze jsou atmosférická koroze, koroze v kapalinách a půdách a dále koroze vodnými roztoky kyselin, zásad a solí. V praxi se setkáváme nejen s rovnoměrnou korozí, při níž koroduje víceméně celý povrch kovu, ale se zvláštními, velmi nebezpečnými formami, jako je bodová a mezikrystalová koroze, korozní praskání, korozní únava, vibrační koroze, koroze bludnými proudy aj.

### **2.3.2 Druhy koroze z hlediska korozního prostředí**

#### Atmosférická koroze

Většina kovových výrobků plní svou funkci v atmosféře; proto se tento druh koroze vyskytuje v největším rozsahu. Názorné příklady uvádí obr. 26.

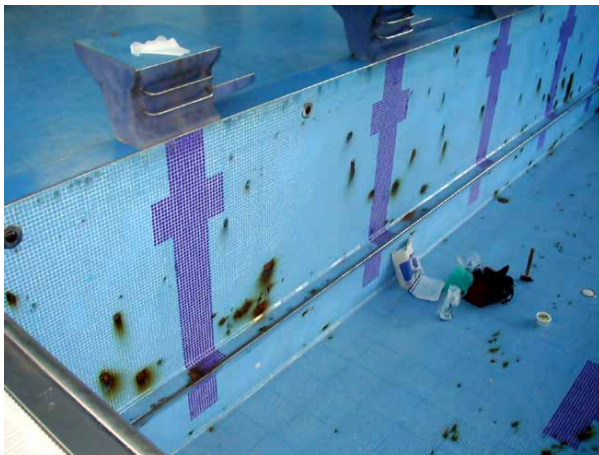


Obr. 26 Atmosférická koroze

První z vlivů, které spolupůsobí na atmosférické korozi, jsou klimatické podmínky dané vlhkostí a teplotou vzduchu a jeho znečištěním. Tím je dán i elektrochemický charakter této koroze. Korozní děj probíhá pod velmi tenkou vrstvou vody, nasycené rozpustnými složkami atmosféry, hlavně oxidem siřičitým, oxidem uhelnatým, amoniakem, chlorovodíkem a aerosoly. Tento vodní film o tloušťce 50 až 150 mikrometrů vzniká kondenzací vodních par, obsažených ve vzduchu, jako vznik je tedy podmíněn relativní vlhkostí vzduchu. Je-li povrch kovu drsný a pokrytý prachem a nečistotami, tvoří se vodní film při nižší relativní vlhkosti, asi kolem 60%, a nazývá se kritická relativní vlhkost. Důležitý význam má i kyslík, který proniká tenkým filmem a účastní se katodické reakce jako depolarizátor a urychluje tak korozi. Za nízkých teplot (pod bodem mrazu) je rychlost koroze velmi malá. V průmyslových atmosférách vzrůstá rychlost až na čtyřnásobek rychlosti v čisté atmosféře, což je způsobeno přítomností  $\text{SO}_2$ , především z produktů spalování uhlí a ropy.

### Koroze v kapalinách

Z oblasti koroze v kapalinách má největší význam koroze ve vodách, obr. 27. Do styku s vodou přicházejí vodní stroje, stroje a zařízení na výrobu páry, chladicí systémy motorů, kompresorů a jiných strojů, rozvodná potrubí a armatury pitných a průmyslových vod aj. Agresivita vod z hlediska koroze je kromě tvrdosti závislá na hodnotě pH, na množství plynů rozpuštěných ve vodě, hlavně kyslíku, na teplotě a proudění vody. Kyslík se v průběhu elektrochemické koroze uplatňuje jako depolarizátor. Vody pro průmyslové účely se změkčují, chemicky upravují a odplyňují.



Obr. 27 Koroze ve vodách

### Půdní koroze

Půda se skládá z plynné, kapalně a tuhé fáze. Korozním prostředím je zde kapalná fáze půdy, která jí dává elektrickou vodivost. V podstatě jde o korozi ve vodách různého složení. Z plynné fáze se opět uplatňuje kyslík jako depolarizátor.

### 2.3.3 Druhy koroze z hlediska kombinace s vnějšími činiteli

- Koroze při mechanickém namáhání materiálu
- Koroze při únavě materiálu
- Vibrační koroze
- Korozní praskání
- Koroze bludnými proudy

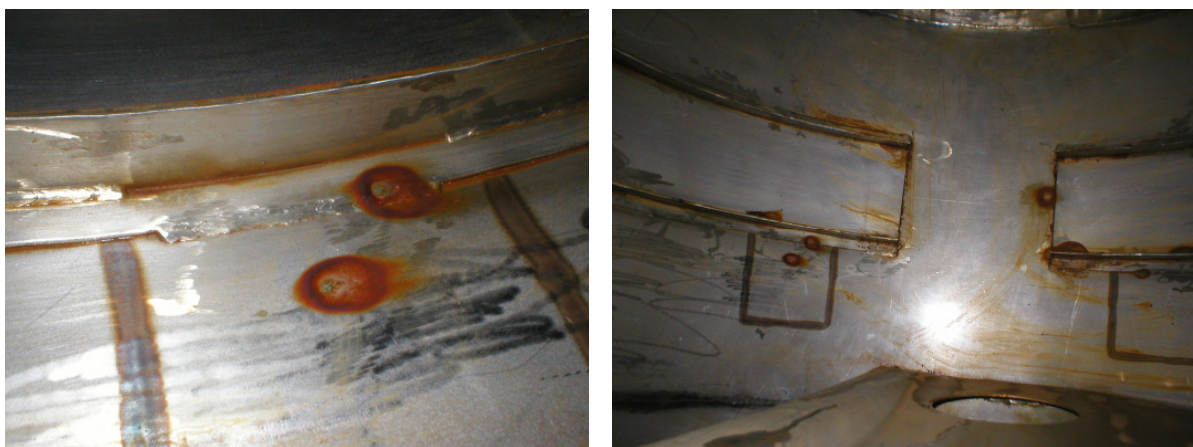
### 2.3.4 Druhy koroze z hlediska typu korozního napadení

#### Rovnoměrná koroze

Korozní napadení je rovnoměrné a má stejnou rychlost na celém povrchu, které je ve styku s korozním prostředím. Tento typ koroze je velmi snadno kontrolovatelný a předvídatelný.

#### Nerovnoměrná koroze

Koroze probíhá nerovnoměrně, vzniknou-li v korozním systému heterogenity a to buď na straně prostředí nebo na straně materiálu. Výskyt nerovnoměrných forem koroze se předpovídá mnohem hůře než u rovnoměrného napadení. Stejně tak u tohoto typu napadení dochází snadněji k selhání výrobku v kratší době. Mezi tzv. nerovnoměrné formy koroze patří podle nejjednoduššího dělení galvanická, štěrbinová a bodová koroze, obr. 28, korozní praskání, mezikrystalová, selektivní a erozní koroze.



Obr. 28 Bodová koroze

#### Plošná koroze

Napadením médií a atmosféry korozí, způsobí nerovnoměrné zmenšování tloušťky stěn a tím růst napětí. K výraznějšímu zeslabování stěny dochází nad hladinou uskladňovaného média, v oblasti svarů a u dnů skladovacích nádrží. To může vést k lokálnímu vypoulení stěny a jejímu následnému protržení.



## Důlková koroze

Vlivem změny proudění média nebo místním působením vlhkosti pod nedokonalou izolací, dochází v omezených oblastech povrchu těles k difúzi agresivních složek do povrchu materiálu těles. Vzniká zrychlené napadení materiálu a tím zeslabování stěn tvorbou důlků. Stěny, které jsou lokálně oslabené a mají zvýšenou plastickou deformaci, mohou přivodit vznik trhlin a to buď při cyklickém namáhání tělesa, nebo existencí makrodefektů materiálu, anebo účinkem koroze pod napětím.

## Koroze pod napětím

Tento typ koroze je nejzákladnější a nejnebezpečnější. Rychlost růstu trhliny se pohybuje řádově v  $2 \cdot 10^{-6}$  mm/s. Poškozování materiálu korozí pod napětím je možné zpomalit prodloužením stádia nukleace trhliny schopné rychlého růstu. Pro určitý materiál s daným provozním napětím je toho možné dosáhnout pouze snížením chemických příměsí v médiu, které je v kontaktu s napadaným povrchem stěny konstrukce. I když je materiál daný, jeho povrch se pokryje odolnější vrstvou, např. niklem. Úroveň napětí obvykle nelze snížit, kromě oblastí s koncentrací napětí.

## Protikorozní ochrana

Základní znalosti o mechanismu a kinetice korozních dějů umožňují zabránit korozi, nebo ji alespoň zpomalit. Volba protikorozní ochrany zařízení je velmi složitým problémem. Vyplyvá ze zhodnocení všech technických i ekonomických hledisek a zasluhuje včasné řešení již ve stádiu přípravy výroby či tvorby a je součástí každého projektu, konstrukce nebo plastiky.

Způsoby ochrany proti koroznímu napadení z technického hlediska, se dělí takto:

- volba vhodného konstrukčního materiálu, popř. úprava jeho složení tak, aby daným podmínkám vyhovoval
- změna vlastností, korozního prostředí anebo ostatních technologických podmínek (odstranění stimulujících součástí v prostředí, inhibice, změna fyzikálních parametrů, aj.)
- úprava konstrukce zařízení tak, aby koroze byla snížena na přípustnou míru
- elektrochemická ochrana (katodická, anodická, popř. elektrická drenáž pro snížení vlivu bludných proudů) - využití ve vhodných případech
- volba ochranného povlaku dostatečné korozní odolnosti i tloušťky, aby zaručoval požadovanou životnost zařízení (využití možnosti povlaků kovových, anorganických, silikátových, kyslíčkových aj., organických apod.).

Pravidla, která by měla být dodržována:

- Zabránit styku s elektrochemicky rozličenými kovy tj. eliminovat možnost vzniku korozně nebezpečných makročlánků.
- V případě konstrukce aparatur odstranit všechny styky stěn pod ostrými úhly, šterbiny a prohlubně, které mohou vést k zadržování kapalin, k usazování kalů. apod. Nahromaděním látek v těchto "slepých prostorech" mohou vzniknout nebezpečné korozní články.
- Správná konstrukce svarových spojů. Při nesprávné konstrukci svarových spojů může dojít k jejím závažným nedostatkům a to následkem vzniku šterbin. Problém

se objevuje např. při vyústění trubek do aparatur, kde se poměrně snadno mohou vytvořit podmínky pro vznik štěrbinové koroze.

- Umísťovat aparatury na nosných sloupech, aby se pod nimi nehromadily agresivní kapaliny. To platí především o zařízeních vyrobených z korozivzdorných ocelí nebo z hliníku, u nichž by při přímém uložení na zemi mohly vznikat nebezpečné články s diferenční aerací, anebo následkem nedostatečného styku s kyslíkem by mohlo docházet k aktivaci a rychlé místní korozi.
- Vhodně použít materiál pro těsnění, ucpávky apod., a tím zabránit vzniku makročlánků ve styku kovových materiálů s různými nekovovými materiály. Nejlépe vyhovují nepórovité, odolné materiály, jako např. plastické hmoty typu teflonu, polyetylénu, PVC a další, podle podmínek provozu a vlastností prostředí. Nevyhovující je použití nasáklivých pórovitých materiálů.
- Volba vhodné technologie svařování a tepelného zpracování

Náklady na odstranění koroze se dělí na přímé a nepřímé. Přímé náklady jsou například peníze vynaložené na úpravu a natření napadené plechové části soustruhu. Nepřímé náklady jsou způsobeny například ztrátami, které takové firmě vzniknou v souvislosti s nemožností používání soustruhu během oprav. Tyto (nepřímé) náklady jsou obvykle daleko větší než přímé. V České Republice koroze způsobí každoročně škody za cca 25 miliard Kč.

### Korozní zkoušky

Vzhledem k velkému počtu činitelů, ovlivňujících odolnost proti korozi, je zjišťování korozních vlastností materiálu obzvláště obtížné. Z tohoto důvodu není většinou jednoduché najít vhodné zkušební metody, charakterizující materiál pro dané podmínky, jako je tomu u zkoušek mechanických. Rozhodující jsou především dvě hlediska, a to rychlost, jakou má být zkouška provedena a přesnost, s jakou má určit odolnost, popř. životnost výrobku

Korozní zkušební metody dělíme na:

- dlouhodobé zkoušky v provozních podmínkách - jsou nejbezpečnější, neboť u nich odpadá nejistota, vznikající extrapolací výsledků kratších zkoušek nebo napodobením hlavního korozního činitele (zkoušky atmosférické, v průmyslových aparaturách a v přírodních vodách a půdách)
- laboratorní zkoušky kratšího trvání (několik měsíců, týdnů nebo dnů) - napodobují rozhodující činitele provozních podmínek, které mají vliv na korozní rychlost a vhodně zesilují jejich účinek (např. sklon korozivzdorných ocelí k mezikrystalové korozi se zkouší po zcitlivění oceli.
- nepřímé korozní zkoušky - dovolují z určitých vlastností, nejčastěji elektrochemických, usuzovat korozní odolnost materiálů

Metoda hodnocení korozních zkoušek je dána jejich druhem, průběhem korozního napadení a účelem, pro který je zkoušený materiál určen. Relativně správných výsledků korozních zkoušek lze dosáhnout např. extrapolací křivky rychlost koroze-čas, zjištěné pokusem. Pro běžné zkoušky kovů je nejobvyklejší zjištění změn hmotnosti a z nich vypočtených rozměrových úbytků (mm/rok). Dochází-li k nerovnoměrné korozi, je třeba použít k jejímu vyhodnocení metod určujících hloubku napadení. Tak např. u mezikrystalové koroze určujeme změny fyzikálních vlastností před korozním napadením a po něm (např. elektrické vodivosti, modulu pružnosti nebo meze pevnosti v tahu, ohybu atd.) nebo se používá metalografického rozboru.

### 3 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo popsat jedny z nejčastějších druhů poškození materiálu v procesním průmyslu a seznámit se s jejich vlivem na materiál v procesních zařízeních a se způsobem jeho vyhodnocování.

V procesních zařízeních, kde je materiál velmi často namáhán cyklickým zatěžováním, ať už deformačního nebo silového původu, dochází k vysokocyklové únavě materiálu. Tam, kde zařízení pracují při zvýšených teplotách, je nejčastějším druhem poškození tečení materiálu (creep). A u zařízení, která jsou náchylná na prostředí, v němž pracují, je materiál často poškozován korozí.

Bylo provedeno stručné shrnutí významu jednotlivých druhů poškození v procesním průmyslu, jejich mechanismy vzniku a vyhodnocení, které je, ať už pro návrh zařízení nebo pro odhadování jejich životnosti, nezbytné a velmi důležité.

## 4 LITERATURA

- [1] <http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P10.ppt>
- [2] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.doc>
- [3] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/08a%20-%20unava1.doc>
- [4] Vejvoda S.: *Stavba procesních zařízení*, CERM s.r.o., Brno 2002
- [5] <http://jaja.kn.vutbr.cz/~janirek2/dok/materialy/7tUnava.doc>
- [6] <http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P11.pdf>
- [7] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Koroze>
- [8] <http://konstrukce.webz.cz/sups/2too1.html>